

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

А. Ф. ЖАРКІН<sup>1</sup>, В. О. НОВСЬКИЙ<sup>1\*</sup>, В. В. МАРТИНОВ<sup>2</sup>, А. Г. ПАЗЄЄВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> відділ стабілізації параметрів електромагнітної енергії, Інститут електродинаміки НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup> відділ транзисторних перетворювачів, Інститут електродинаміки НАН України, Київ, Україна

\*e-mail: [novsky@ied.org.ua](mailto:novsky@ied.org.ua)

**АНОТАЦІЯ.** Розглянуто особливості практичного застосування розроблених багатофункціональних засобів забезпечення надійного електропостачання і нормованих показників якості напруги в електричних мережах малих систем розподілу. Зазначено, що ці системи розподілу мають низку відомих переваг перед традиційними системами електропостачання. Зокрема, така система включає в себе, як правило, кілька джерел розподіленої генерації, розподільних підстанцій та накопичувачів і перетворювачів енергії, що дозволяє такій системі «Microgrid Plus» функціонувати як в автономному режимі, так і бути пов'язаною з зовнішньою енергетичною системою. В малій системі розподілу якісне електропостачання можна забезпечити шляхом застосування, наприклад, нерегульованих і керованих фільтросиметруючих пристроїв або гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів, а також використання відновлюваних джерел енергії з системами її накопичення («Energy Storage System»). Розглянуто основні аспекти практичної реалізації силової частини багатофункціонального двонапрявленого перетворювача електроенергії у складі уніфікованого інверторного модуля потужністю 300 кВт для використання в сучасних багатомодульних системах накопичення енергії значної потужності з різними типами джерел енергії. Показано, що розроблені двонапрявлені перетворювачі у складі систем накопичення енергії в нормальних режимах роботи можуть забезпечити необхідний рівень електромагнітної сумісності споживачів та регламентовані значення показників якості напруги в «Microgrid Plus», зокрема, значення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень вхідних та вихідних струмів цих перетворювачів складають одиниці відсотків, при необхідності вони можуть здійснювати у мікромережі компенсацію реактивної потужності тощо. Практичне застосування запропонованих систем розподілу сприяє реалізації загальної концепції «Smart Grid & Energy Storage», яка спрямована на розширення можливостей відновлюваної енергетики та інтеграцію в системи інтелектуальних електричних мереж.

**Ключевые слова:** електромагнітна сумісність, система розподілу електроенергії, двонаправлений напівпровідниковий перетворювач, система накопичення енергії, мікромережа, якість напруги.

## PROVISION OF HIGH QUALITY POWER SUPPLY IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

A. ZHARKIN<sup>1</sup>, V. NOVSKY<sup>1</sup>, V. MARTYNOV<sup>2</sup>, A. PAZIEIEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of stabilization of electromagnetic energy parameters, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Department of transistor transformers, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**ABSTRACT.** Features of practical application of the developed multifunctional tools which provide reliable power supply and standard voltage quality characteristics in electrical networks of small power systems (microgrid) are considered. It is noted that these distribution systems have a number of known advantages over traditional power supply systems. In particular such system typically includes several sources of distributed generation, distribution substations, power storages and energy converters, which allows such a "Microgrid Plus" system to function offline or synchronously with an external power system. In microgrid, high-quality electrical supply can be achieved by, for example, using unregulated and controlled filtering-balancing devices or hybrid filter-compensating converters as well as the use of renewable energy sources and power accumulation system. The main aspects of the practical implementation of the power unit of a multifunctional bi-directional electric power converter as a part of a unified 300 kW inverter module for use in modern multimodal energy storage systems of significant power with different types of energy sources are considered. It is shown, that use of bi-directional converters in the system of energy accumulation can provide the required level of power quality in «Microgrid Plus» in normal operating modes, in particular, the values of the THD of the input and output currents of these converters are several percents. In addition, they may, if necessary, compensate reactive power in these microgrid. The practical application of mentioned systems contributes to the implementation of the general concept of "Smart Grid & Energy Storage", which aims at expanding the capabilities of renewable energy and integrating into smart electrical networks.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, power distribution system, bi-directional semiconductor converter, energy storage system, microgrid, voltage quality.

## Вступ

Одним з шляхів, що пропонується, вирішення проблеми забезпечення якісного електропостачання в електричних мережах «малих систем розподілу» (МСП), в тому числі з сучасними системами накопичення енергії (СНЕ) і відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) є розроблення і впровадження перспективних багатофункціональних технічних засобів на основі використання параметричних і регульованих фільтрів струмів нульової послідовності (ФСНП) для створення штучної нейтралі, а також багатофункціональних двонаправлених перетворювачів електроенергії у складі СНЕ. Мала система розподілу електроенергії згідно з пунктом II Кодексу систем розподілу (далі – Кодекс) це електрична мережа, яка приєднана до мереж системи розподілу або передачі, якою здійснюється розподіл електричної енергії певній кількості Користувачів [1]. Пункт IX зазначеного Кодексу «Мала система розподілу» визначає критерії та класифікації МСП, а саме кількість приєднаних точок (Користувачів – юридичних або фізичних осіб) до МСП – більше 2, приєднану потужність Користувачів МСП – більше 50 кВт та середньомісячний обсяг розподілу електричної енергії МСП – більше 5 тис. кВт•год, причому розподіл електричної енергії здійснюється менше 10000 побутових споживачів. Крім того, в Кодексі зазначається, що електричні мережі МСП розподіляють електричну енергію Користувачам на обмеженій території закладів комерційного призначення (офісні центри, торговельно-розважальні комплекси тощо), громадського обслуговування (спортивно-оздоровчі комплекси, санаторно-курортні комплекси тощо), або використовуються споживачами для задоволення своїх потреб (садові товариства, гаражні кооперативи, котеджні містечка тощо), визначених відповідним статутом організацій та/або об'єднань громадян та ін. В п. VI цього Кодексу також наведено вимоги стосовно моніторингу і фіксації параметрів якості електричної енергії в системі розподілу (СР). Таким чином, «малі системи розподілу» цілком відповідають всім критеріям і характеристикам мікромереж «*MicroGrid*» і «*NanoGrid*», концепція побудови яких ґрунтується на створенні локальних мережевих енергетичних структур в окремих регіонах. *MicroGrid* в цілому являє собою локальну ізольовану мережу, причому чіткої межі потужності для неї не існує, тому зазвичай вона не вказується. Наприклад, світова компанія «*ABB*» встановила для себе таку межу: для *MicroGrid* – сумарна потужність близько 20 МВт, а *NanoGrid* обмежується потужностями до 50 кВт. [2, 3]. Ця ж компанія для управління режимами мікромереж за допомогою швидкого контролю (*MicroGrid-Controller*) параметрів мережі з системою накопичення енергії, стабілізацією напруги і паралельною експлуатацією традиційних і відновлюваних джерел ввела назву «*MicroGrid Plus*» для забезпечення практично повного балансу мережі. [4, 5]. Мікро – та наномережі мають низку переваг перед традиційними системами генерування і постачання енергії та розглядається як сис-

тема взаємопов'язаних і об'єднаних мережею об'єктів, що генерують електроенергію в мережу та споживають енергію з неї. Вони можуть працювати не тільки автономно, але і паралельно з основною електромережею, зокрема, при використанні двох і більше джерел ВДЕ, які в основному використовують сонячну та вітряну енергію. Основною особливістю МСП є співмірність потужностей джерел і споживачів електроенергії й великий взаємозв'язок всіх елементів електричної мережі, тому ефективність роботи МСП великою мірою визначається ефективністю забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) відповідними технічними засобами.

## Мета роботи

Розроблення багатофункціональних технічних засобів для забезпечення надійного та безперебійного електропостачання і нормованих стандартами значень показників якості напруги і електромагнітної сумісності споживачів в електричних мережах систем розподілу, зокрема, при наявності відновлюваних джерел енергії та систем її накопичення («*ESS*» – «*Energy Storage System*») на основі реалізації сучасних концепцій «*MicroGrid*» і «*MicroGrid Plus*».

## Виклад основного матеріалу

Ефективність функціонування МСП пов'язана з такими показниками як надійність, безперебійність та якість електропостачання, безпека та стійкість електромережі (розподільна мережа значно більш стійка до зовнішніх впливів у порівнянні з енергосистемою, яка залежить від централізованих джерел енергії). В той же час в «острівних» електричних мережах при наявності лише відновлюваних джерел, які ізольовані від магістральних мереж, неможливо виробляти якісну електроенергію без паралельного підключення традиційних джерел енергії [6, 7]. Зазвичай об'єкти розподіленої генерації (РГ) виконано на основі статичних перетворювачів, що дозволяє номінальну вихідну активну потужність від них отримати при коефіцієнті потужності, що дорівнює одиниці. В цілому допускається активна потужність споживачів, підключених до джерел розподіленої генерації (ДРГ), пропорційно знижується відповідно до значення коефіцієнта потужності, а також «хрест-фактора» («пик – фактора» або «коефіцієнта амплітуди») – відношення величини амплітуди (пікового або максимального значення) струму або напруги до його діючого значення. Крім цього, спотворена форма споживаного струму призводить до погіршення показників якості напруги (ЯН) електропостачання і, відповідно, до додаткових втрат активної потужності та низки інших негативних чинників.

Тому для забезпечення ефективної роботи МСП в умовах, коли потужність навантажень, які споживають несинусоїдальний і (або) реактивний струм, в порівняно з номінальною потужністю джерел РГ, необхідно вживати заходів для підвищення коефіцієн-

та потужності навантаження і зниження зазначеного «хрест-фактора» споживаного струму. Крім цього, для забезпечення нормованих показників ЯН електропостачання необхідно забезпечувати обмеження рівнів емісії збурень від обладнання споживачів навантаження на встановленому рівні (гармонічні спотворення струму, коливання напруги і флікери, несиметрія навантаження та ін.).

Така мікромережа може функціонувати як в автономному режимі, так і синхронно із зовнішньою енергетичною системою та реалізує можливість забезпечення безперервного живлення споживачів якісною електроенергією. Слід зазначити, що протягом останніх років в Україні спостерігається значне збільшення обсягів виробництва вітрової та сонячної енергії. За прогнозами, до 2035 року питома вага "зеленої" енергетики в енергобалансі України становитиме близько 25%. Як зазначається в матеріалах НЕК «Укренерго», це завдання може бути вирішено за допомогою практичного застосування сучасних систем накопичення енергії (СНЕ). Для цього, наприклад, Франція у 2019 році надала Україні перший грант на 560 тис. євро для фінансування підготовки спільного пілотного проекту НЕК "Укренерго" та «*RTE International*» з реалізації першої в Україні системи «*Energy Storage*» потужністю 200 МВт.

На рис.1 наведено структурну схему мікромережі «*MicroGrid Plus*», основним елементом якої є СНЕ, що виконано на основі напівпровідникових дво-напрямлених перетворювачів (ДНП). Особливістю даної мікромережі є те, що до її загальних шин низької напруги окрім нелінійного і нестационарного навантаження приєднано відповідальні електроприймачі, перерви в електропостачанні яких, провали напруги та короткі переривання електропостачання, а також неякісна напруга їх електроживлення може привести до порушення складного технологічного процесу, пошкодження енергообладнання з можливою небезпекою для життя людей, а також до значних матеріальних і економічних збитків [6, 8, 9].

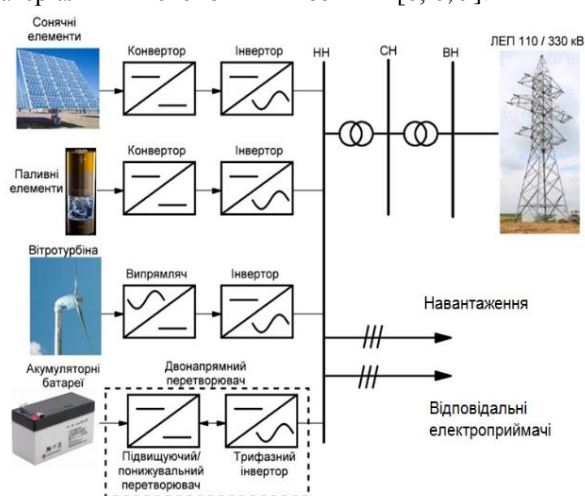


Рис. 1 – Структурна схема мікромережі «*MicroGrid Plus*»

Тому перспективними і ефективними технічними засобами для вирішення зазначених проблем і забезпечення ЕМС у трифазних системах, зокрема, з ДРГ є застосування нових перетворювальних пристроїв з високими енергетичними та динамічними показниками для регулювання активної й реактивної потужностей, а також зниження потужності спотворення, що дає змогу, зокрема, підвищити техніко-економічні показники та пропускну спроможність МСР, зменшити втрати активної потужності та підвищити енергоефективність електрообладнання, яке є чутливим до зниження показників ЯН.

Дослідження показали, що застосування, наприклад, потужних СНЕ в системах розподілу енергії дозволяє здійснити наступне [6,10, 11]:

1. Покриття пікових навантажень і «згладжування» графіків навантаження протягом доби.
2. Підвищення якості електроенергії та надійності роботи системи енергопостачання.
3. Забезпечення резервного електропостачання відповідальних споживачів і підтримання електропостачання їх при аварійних перериваннях.
4. Накопичення електроенергії в період її низької вартості та споживання електроенергії з накопичувача в період її високої вартості протягом доби при наявності багатозонних тарифів на електроенергію.
5. Інтеграцію з генеруючим енергообладнанням відновлюваної енергетики для забезпечення балансу генерованої та споживаної електроенергії в мережі з ВДЕ.

Для електроживлення відповідальних електроприймачів в МСР «*MicroGrid Plus*» при підключенні до шин низької напруги у точці загального приєднання нелінійних і нестационарних навантажень необхідно застосовувати локальні ділянки електропостачання (ЛДЕП), які використовують параметричні фільтри струмів нульової послідовності (ФСНП), що виконано за схемою «зустрічний зигзаг», для створення штучної нейтралі у низьковольтній мережі. Слід визначити, що переважний вплив на ЯН в низьковольтних мережах виявляють струми нульової послідовності (НП) і непарних гармонік, кратних трьом, які замикаються по контуру нульової послідовності мережі. При традиційному приєднанні відгалуження до основної електричної мережі контури струмів НП, вона і відгалуження перебувають у безпосередньому електричному зв'язку. Очевидно, що при цьому ЯН як в основній електричній мережі, так і у відгалуженні визначається в основному системою з більшим значенням потужності. Тому для одержання високої ЯН в локальній ділянці (відгалуженні) треба «розділити» за допомогою фільтрів струмів нульової послідовності контури протікання струмів НП в МСР, залишивши зв'язаними контури протікання струмів прямої та зворотної послідовностей [12, 13].

На основі запропонованих принципів побудови розроблено низку технічних рішень щодо модернізації трифазних низьковольтних мереж з локальними ділянками електропостачання відповідальних навантажень.

тажень (ВН) або електроприймачів (ВЕР), що виконано на основі використання нерегульованих і керуєваних ФСНП. В кожній секції відгалуження МСР завдяки відомим властивостям ФСНП не виникає зміщення штучної нейтральної точки (ШНТ), яка гарантовано знаходиться в геометричному центрі трикутника лінійних напруг та досягається симетрія фазних напруг. Цим забезпечується висока ЯН та стабільність трифазної напруги живлення навантажень відповідної секції відгалуження, а завдяки відсутності нейтрального провідника в схемі даного відгалуження і наявності ФСНП. Це еквівалентно створенню низки ШНТ в мережі, які гарантовано знаходяться в геометричному центрі трикутника лінійних напруг, а також забезпечує високу стабільність і симетрію фазних напруг трифазної мережі та призводить до суттєвого вирівнювання струмів в лінійних провідниках і, як наслідок, до зменшення втрат електричної енергії в основній мережі.

На рис.2 наведено електричну схему фрагменту МСР на основі найпростішої локальної ділянки електропостачання зі штучної нейтраллю, яку створює нерегульований ФСНП першого типу.

На рис.3 наведено МСР зі штучними нейтраллями, які створюються кількома ЛДЕП на основі нерегульованих ФСНП з вольтододатковими обмотками, що призначені для підвищення рівня напруги на

затискачах  $BH_1 - BH_n$  для компенсації її втрат на ділянках продовж лінії від силового трансформатора (СТ).

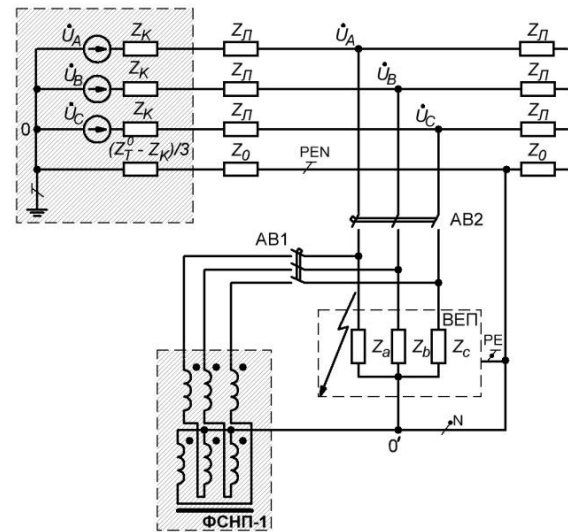


Рис.2 - Локальна ділянка електропостачання МСР, яка створена на основі ФСНП-1

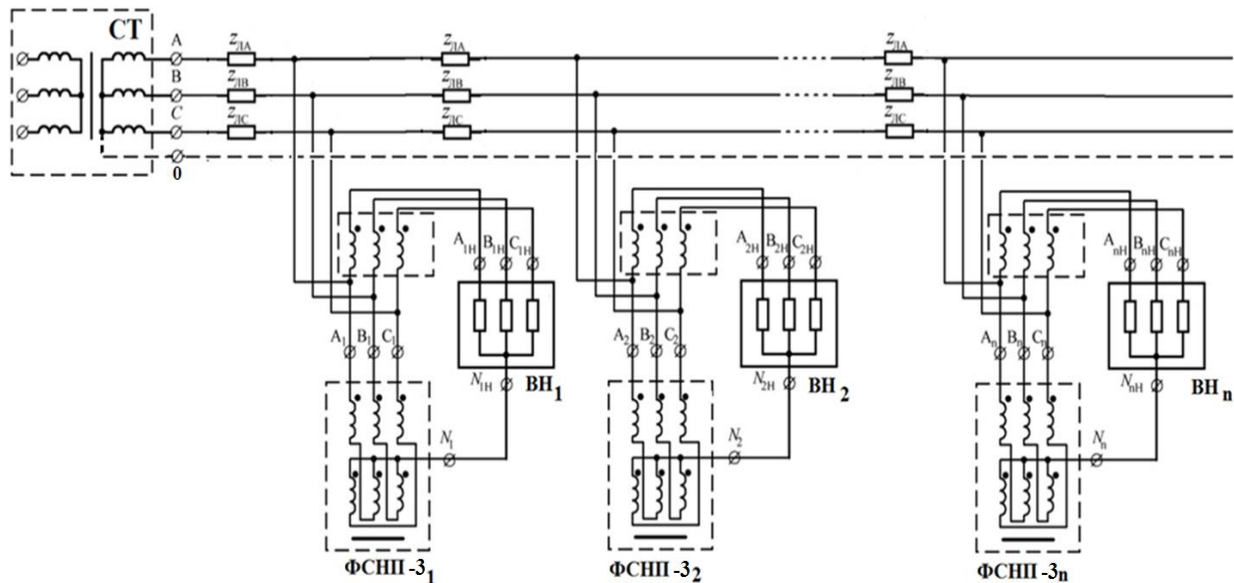


Рис. 3 – МСР з ЛДЕП, що виконана на основі ФСНП-3 з вольтододатковими обмотками

Розвитком цього шляху побудови МСР з ЛДЕП є розроблення гібридного фільтрокомпенсуючого перетворювача (ГФКП), що виконаний на основі «розподільного СТАТКОМ» і регульованого ФСНП з вольтододатковими обмотками для забезпечення ЕМС і комплексного покращення якості напруги та електробезпеки [13-15]. На рис.4 наведено ЛДЕП, що виконано на основі ГФКП першого типу.

На основі розроблених принципів побудови ЛДЕП відповідальних електроприймачів, які викорис-

товують ФСНП різного типу (пріоритет запропонованих ЛДЕП захищений низкою патентів) розроблено і досліджено в нормальних і номінальних режимах роботи МСР. Теоретичні та експериментальні дослідження зазначених багатofункціональних пристроїв, деякі з яких наведено вище, показали їх високу ефективність і перспективність їх практичного використання в низьковольтних МСР, зокрема, при під'єднанні відповідних елементів регулювання і СНЕ оптимальної потужності.

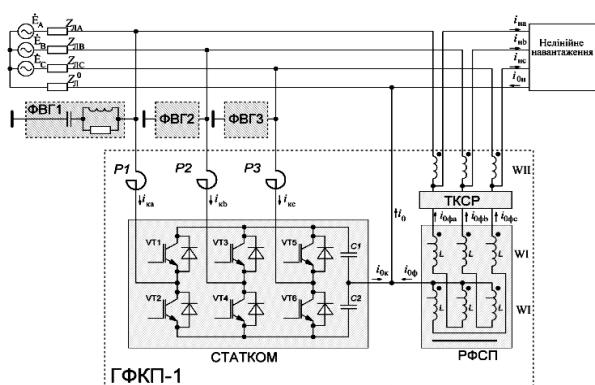


Рис. 4 - ЛДЕП, що виконана на основі ГФКП

Як зазначалось, структура перспективних СР в першу чергу визначатиметься типом наявних джерел енергії, але в будь-якому випадку важливою їх частиною є системи, що здатні реалізувати технології ефективного використання накопиченої електроенергії (концепція «ESS»), до суттєвих переваг якої належать функціональна гнучкість, можливість автоматизації процесів управління і контролю, і як наслідок широ-

кої інтеграції в системи інтелектуальних електричних мереж («Smart grid»).

Для вирішення основних задач у даному напрямку в ІЕД НАН України в 2018 році створено уніфікований інверторний модуль УІМ-300 потужністю 300 кВт для використання в багатомодульних СНЕ значної потужності з різними типами джерел енергії. Його основою є двонапрявлений перетворювач (ДНП), який призначений для створення СНЕ практично будь-якої потужності (від одиниць до сотень МВт) при паралельному підключенні УІМ-300 та складається з ДППН і трифазного перетворювача (інвертора).

Накопичувачі електричної енергії (НЕ) складаються з акумуляторних батарей (АБ) різного типу (наприклад, свинцево-кислотні, літій - іонні, літій-залізо-фосфатні та ін.), а також додатково суперконденсаторів тощо [16-18].

На рис.5 наведена спрощена структурна схема силової частини багатофункціонального двонапрявленого перетворювача електроенергії у складі УІМ-300, який є чотириквadrантним «4Q – перетворювачем» повної потужності та базовою складовою СНЕ в цілому.

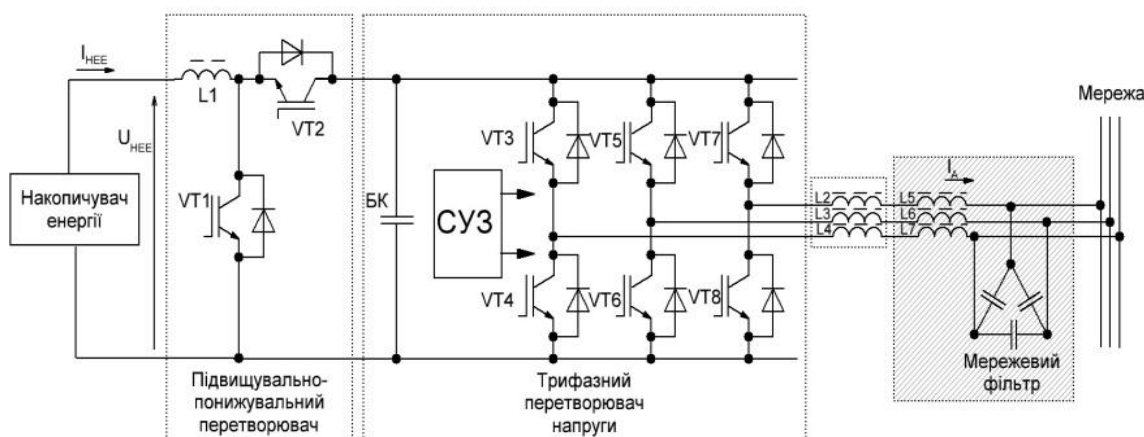


Рис.5 - Структурна схема силової частини багатофункціонального ДНП

Для СНЕ характерними є два режими роботи: режим накопичення енергії в період її надлишку в електромережі (нічні години) та режим віддачі енергії в мережу в період дефіциту електроенергії в ній (вечірні години) за допомогою двонапрявленого підвищувально-понижувального перетворювача (ДППН) постійної напруги, який необхідний для узгодження напруги АБ з шиною живлення трифазного інвертора, тобто в залежності від балансу потужностей підключених джерел електроенергії та споживачів, така СНЕ працює в режимі або накопичення енергії в АБ або відбору енергії з нього. В першому режимі, при передачі електроенергії від АБ до трифазної мережі, ДППН працює як підвищувальний стабілізатор постійної напруги, що забезпечує формування постійної

стабілізованої напруги живлення інвертора підвищеного рівня, а в другому режимі, при передачі енергії до АБ – як понижувальний регулятор (стабілізатор) постійного струму для забезпечення необхідних характеристик зарядки АБ. Двонапрявлений інвертор в першому режимі виконує функцію перетворення енергії постійного струму, отриману від АБ, в енергію змінного струму трифазної мережі, а в другому режимі – функцію трифазного активного випрямляча для забезпечення струму заряду накопичувача електроенергії, тобто активного коректора коефіцієнта потужності (АККП) для поліпшення якості напруги в електричній мережі за рахунок примусового формування споживаного трифазного струму практично синусоїдальної форми, що забезпечує коефіцієнт потужності близь-



ким до одиниці. Для передачі реактивної енергії різниця фазового кута між струмом і напругою повинна знаходитись в межах від нуля до 180 ел. град, що дозволяє не тільки змінювати напрямок передачі електроенергії залежно від стану системи розподілу. Створення дослідного зразка УІМ-300 базується на результатах теоретичних і експериментальних досліджень електромагнітних процесів в зазначених перетворювачів [18,19]. На виході трифазного інвертора в обох напрямках передачі енергії формуються струми практично синусоїдальної форми (значення THDI становить 2,5%) при забезпеченні одночасно з високим ККД необхідні параметри якості електроенергії на стороні мережі.

На рис.6 наведено осцилограми напруги мережі та струму в кожній фазі інвертора (струм знаходиться у протифазі з напругою мережі, що відповідає передачі енергії від інвертора до мережі). Діюче значення напруги мережі - 233В (чутливість -120 В/поділок) в режимі генерації струму в мережу (максимальне значення струму - 485А) при чутливості - 175А /поділок.

На рис. 7 наведено осцилограми напруги мережі та струму в кожній фазі інвертора (струм знаходиться у фазі з напругою мережі). Це відповідає передачі енергії від інвертора, який працює в режимі АККП, до ДППН (при чутливості -100 В/поділок і - 200А /поділок).

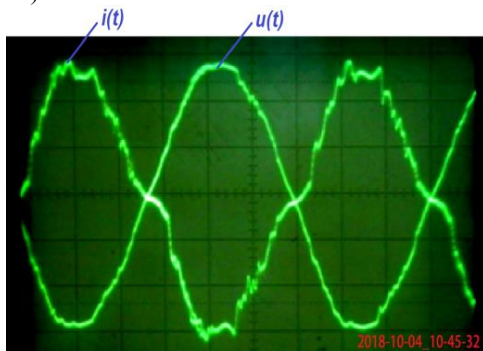


Рис.6 – Напруга і струм у фазі інвертора в режимі передачі енергії від нього до мережі

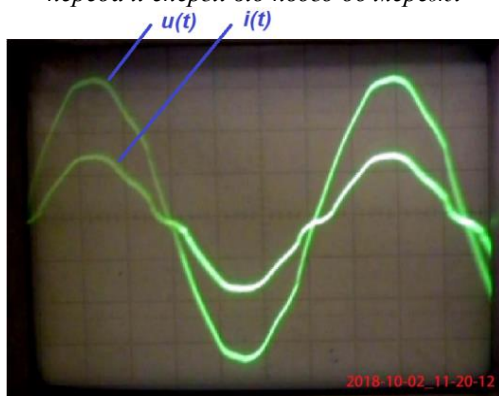


Рис.7 – Напруга і струм у фазі інвертора в режимі передачі енергії від нього до ДППН

Експериментальні дослідження УІМ-300 проводилися при паралельно- послідовному з'єднанні 50 LFP - акумуляторів ємністю 240 А\*год і напругою

48В кожний, причому напруга АКБ в кінці зарядки складала 385В.

На рис.8 наведено фотографії створеного дослідного зразка УІМ-300.



Рис. 8 - Фотографії дослідного зразка УІМ-300

В таблиці 1 наведено основні технічні характеристики розробленого УІМ-300.

Таблиця 1 - Основні технічні характеристики УІМ-300

<b>Параметри на стороні змінного струму</b>	
Номінальна потужність інвертора	300 кВт
Вихідна напруга	230/400 В +10%-15%
Номінальне значення вихідного струму	600 А
Частота вихідної напруги	50 Гц +3%/-5%
Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень ( $THD_1$ )	$\leq 3\%$
ККД при номінальному навантаженні	$\geq 97,5\%$
Коефіцієнт потужності (power factor)	$\geq 0,99$
Навантаження	Розподільна мережа 0,4 кВ / 10 кВ
<b>Параметри на стороні постійного струму</b>	
Діапазон напруг інвертора	400...700 В
Максимальний струм	750 А

Таким чином, практичне застосування розроблених технічних засобів для забезпечення якісного і надійного електропостачання в системах розподілу, зокрема, з системами накопичення енергії на основі створених ДНП, та відновлюваними джерелами енер-

гії, може сприяти реалізації загальної концепції «*Smart Grid & Energy Storage*», яка спрямована на розширення можливостей відновлюваної енергетики та інтеграцію в системи інтелектуальних електричних мереж [20-21].

Значною перевагою розробленого багатофункціонального перетворювача УІМ-300 є можливість його застосування для компенсації реактивної потужності в МСР. На рис.9 наведено схему заміщення імітаційної моделі вузла електричної мережі МСР при підключенні  $RL$  – навантаження та трифазного двонапрямленого перетворювача електроенергії, що працює в режимі АККП.

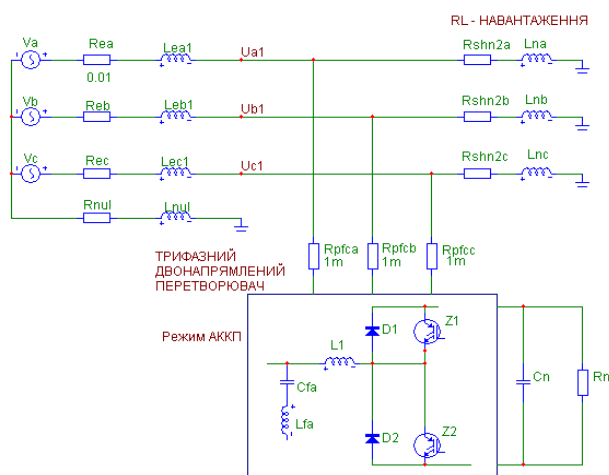


Рис. 9 - Схема заміщення вузла електричної мережі МСР з ДНП

Використання цієї імітаційної моделі дозволяє дослідити електромагнітні процеси в навантажувальному вузлі МСР. В ДНП шляхом регулювання кута між примусово сформованим вхідним струмом перетворювача і мережевою напругою здійснюється компенсація індуктивної складової струму  $RL$  – навантаження.

Деякі результати розрахунків наведено в таблиці 2. При забезпеченні значення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень струму (THDI) мережі I(Lea) на рівні 0,51% досягнуто значення кута фазового зсуву струму мережі 4,8 ел.град. при значеннях кутів фазового зсуву струмів навантаження та перетворювачі у «-» 29 ел.град. та «+» 15 ел.град. відповідно.

Таблиця 2 – Результати розрахунків та моделювання

U<sub>ea</sub>=220V P<sub>n</sub>(PFC)=36.99kW  
U<sub>n</sub>=698.5V P<sub>n</sub>(R<sub>n2a</sub>)=9.7kW  
Q<sub>n</sub>(L<sub>n2a</sub>)=4.6kVAr

fi(i_Rpfca)=15deg	THDi(Lea)=0.51%
fi(i_Zn2a)=-29deg	THDi(Rpfca)=1.8%
fi(iLea)=4.8deg	THDu(Ua1)=2.1%

На рис. 10 наведено часові діаграми струмів фази А лінії  $I(Lea1)$ ,  $RL$ -навантаження  $I(Rshn2a)$  та

перетворювача  $I(Rpfca)$ , що отримано за допомогою розрахунків на імітаційній моделі для наведеного вище прикладу при роботі ДНП в режимі АККП.

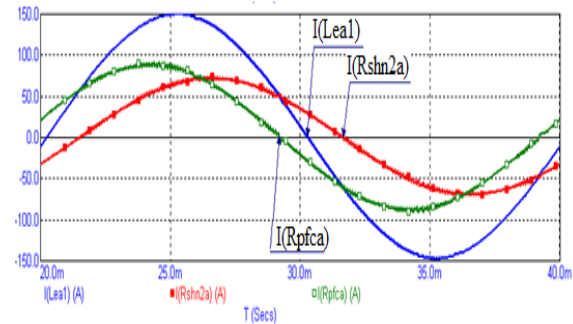


Рис. 10 - Струми фази А в лінії, навантаженні та перетворювачі

Таким чином, шляхом регулювання кута між струмом ДНП і напругою мережі для обох напрямків передачі енергії досягається необхідний рівень компенсації реактивної потужності в точці загального приєднання МСР.

## Висновки

1. Показано, що ефективність роботи малих систем розподілу, електричними мережами яких здійснюється постачання електроенергії кінцевому споживачу, багато в чому визначається забезпеченням надійного електропостачання з нормованими показниками якості напруги, особливо в умовах наявності відновлюваних джерел енергії.

2. Запропоновано в малих систем розподілу створювати локальні ділянки електропостачання зі штучної нейтраллю та мережі з відокремленим від основної мережі контуром для протікання струмів нульової послідовності, що дозволяє комплексно поліпшити якість напруги на затискачах відповідальних навантажень, забезпечити їх EMC, а також підвищити надійність електропостачання.

3. Запропоновано використовувати уніфікований інверторний модуль УІМ-300, який виконаний на основі потужних двонапрямлених підвищувально-понижувального перетворювача постійної напруги і трифазного інвертора для роботи у складі багатомодульних систем накопичення енергії у мікромережах типу «*Microgrid Plus*» для забезпечення регламентованих ДСТУ з ЕМС параметрів якості електроенергії в МСР, наприклад, значення сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень струмів на стороні трифазної мережі становлять менше трьох відсотків.

4. Показано, що багатофункціональний перетворювач УІМ-300 може бути використано для компенсації реактивної потужності в МСР шляхом регулювання кута між примусово сформованим мережевим струмом ДНП і мережевою напругою для обох напрямків передачі енергії.

5. Практичне застосування зазначених багатofункціональних технічних засобів буде сприяти реалізації в комплексі переваг загальної концепції «*Smart*

*Grid & Energy Storage*», яка спрямована на розширення можливостей відновлюваної енергетики та інтеграцію в системи інтелектуальних електричних мереж.

#### Список літератури

- КОДЕКС СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ /Затверджений Постановою НКРЕКП 14.03.2018 № 310/ *Урядовий кур'єр*, 18.04.2018, № 75.– 123 с.
- ABB Power Grids. <https://www.youtube.com/user/ABBPOWER>
- ABB microgrid controls help optimize renewable integration <https://www.youtube.com/watch?v=Yi2V-xeqHGM>
- ABB Microgrid Plus Control System <https://new.abb.com/distributed-energy-microgrids/our-offering/microgrid-plus-system>
- ABB Microgrids & Distributed Generation, January 28, 2019 Advanced microgrids Concept sandex perience. [http://www.itccanarias.org/tilos/files/Presentacion4\\_Pablo\\_Astorga\\_ABB.pdf](http://www.itccanarias.org/tilos/files/Presentacion4_Pablo_Astorga_ABB.pdf)
- Жаркін А. Ф.** Системи електропостачання з джерелами розподіленої генерації / **А. Ф. Жаркін, С. П. Денисюк, В. А. Попов.** – Київ: «Видавництво «Наук. думка» НАН України. – 2017. – 232 с.
- Chandrasena Ruwan P. S.** Dynamic operation and control of a hybrid nanogrid system for future community houses / **Ruwan P. S. Chandrasena, Shahnia, Farhad, Ghosh, Arindam, Rajakaruna, Sumedha** // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2015. – vol. 9 (11). – pp. 1168–1178. doi:10.1049/iet-gtd.2015.0462.
- Company Eaton. Utility scale energy storage – critical infrastructure to provide power even when the grid is off. Utility storage / microgrid demonstration project. June14, 017. [https://www.ibesalliance.org/fileadmin/pdf/08\\_Eaton.pdf](https://www.ibesalliance.org/fileadmin/pdf/08_Eaton.pdf)
- Wang Y.** Coordinated Control of Distributed Energy Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks / **Y. Wang, K. T. Tan, X. Y. Peng, P. L. So** // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – July 2015. – vol. 31 (3). – pp. 1132–1141 doi: 10.1109/TPWRD.2015.2462723.
- Jinghua Zhou.** Energy Storage Power Conversion System in the Micro-grid / **Zhou Jinghua1, Yang Zheng, Zhang Xiaowei** // *International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy*. – 2015. – pp. 261–266. doi: 10.2991/icismme-15.2015.51.
- Prehoda Emily W.** U.S. Strategic Solar Photovoltaic-Powered Microgrid Deployment for Enhanced National Security / **Emily W. Prehoda, Chelsea Schelly, Joshua M. Pearce** // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. – Retrieved 23 May 2017. – 78. – pp.165–175 doi:10.1016/j.rser.2017.04.094.
- Шидловський А. К.** Забезпечення електромагнітної сумісності в локальних електричних мережах // **А.К. Шидловський, А.Ф. Жаркін, В.О.Новський, Н.М. Капличний, О.В. Козлов, Д.О.Малахатка** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2018. – №26 (1302), Том 1. – С. 174–183. doi:10.20998/2413-4295.2018.26.24.
- Жаркін А. Ф.** Комплексне покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання при застосуванні гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів / **А.Ф. Жаркін, В. О. Новський, Д.О. Малахатка** // *Технічна електродинаміка*. – 2018. – №1. – С. 69–78. – doi:10.15407/techned 2018.01.069.
- Kulkarni O.** Power quality improvement using Zig-Zag transformer and DSTATCOM in three phase power distribution system / **O. Kulkarni, M. Mishra M.** // *India Conference (INDICON), Annual IEEE. Mumbai, India*. – 2013. – pp. 1–6. doi: 10.1109/INDCON.2013.6725916.
- Jayaprakash P.** Reduction in rating of voltage source converter of DSTATCOM using a Zig-Zag transformer / **P. Jayaprakash, B. Singh, D. Kothari** // *Industrial Electronics (ISIE)*, Hangzhou, China: IEEE. – 2012. – pp. 1066–1071. doi: 10.1109/ISIE.2012.6237236.
- Деньщиков К. К.** Гибридный накопитель электроэнергии на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / **К. К. Деньщиков, А. З. Жук** // *Презентация ОИВТ РАН*. – 2015. – 20 с. <https://docplayer.ru/30757314>.
- Shen X.** Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System / **X. Shen, S. Zhu, J. Zheng, Y. Han, Q. Li, J. Nong.** // *M. Power & Energy Society General Meeting, IEEE*. – 30 July 2015. – pp. 1–10. doi:10.1109/PESGM.2015.7286069.
- Жаркін А. Ф.** Системи накопичення енергії на основі застосування потужних двонаправлених перетворювачів / **А. Ф. Жаркін, В. О. Новський, В. В. Мартинов, А. Г. Пазєєв, С. О. Палачов, Ю. В. Руденко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2018. – №26 (1302), Том 1. – С. 25–33 doi:10.20998/2413-4295.2018.26.04.
- Жаркін А. Ф.** Дослідження двонаправленого перетворювача постійної напруги уніфікованого інверторного модуля для застосування в системах накопичення енергії / **А. Ф. Жаркін, В. О. Новський, А. Г. Пазєєв** // *Технічна електродинаміка*. – 2018. – № 5. – С. 31–34. doi:10.15407/techned2018.05.031.
- Shen X.** Expansion Planning of Active Distribution Networks with Centralized and Distributed Energy Storage Systems / **X. Shen, M. Shahidehpour, Y. Han, S. Zhu, J. Zheng** / *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. – Aug. 2018. doi:10.1109/PESGM.2018.8585964.
- Singh R.** Experimental Verification of a Battery Energy Storage System for Integrati with Photovoltaic Generators / **R. Singh, S. Taghizadeh, M. Nadia, L. Tan, S. Mekhilef** / *Advances in Power Electronics*. – 2017. – pp.1–10. doi: 10.1155/2017/8158964.

#### References (transliterated)

- KODEKS SYSTEM ROZPODILU /Zatverdzhnyi Postanovoiu NKREKP 14.03.2018 № 310/ Uriadovyi kurier, 18.04.2018, № 75.- 123 p.
- ABB Power Grids. <https://www.youtube.com/user/ABBPOWER>



3. ABB microgrid controls help optimize renewable integration <https://www.youtube.com/watch?v=Yi2V-xeqHGM>
4. ABB Microgrid Plus Control System <https://new.abb.com/distributed-energy-microgrids/our-offering/microgrid-plus-system>
5. ABB Microgrids & Distributed Generation, January 28, 2019 Advanced microgrids Concept sandex perience. [http://www.itccanarias.org/tilos/files/Presentacion4\\_Pablo\\_Astorga\\_ABB.pdf](http://www.itccanarias.org/tilos/files/Presentacion4_Pablo_Astorga_ABB.pdf)
6. Zharkin, A. F., Denysiuk, S. P., Popov, V. A. Системи електроснабження з устаткуванням розподільної генерації. Київ: «Видавництво «Nauk. dumka» NAN Ukrainy. 2017. 232 p.
7. Chandrasena, Ruwan P. S., Shahnia, Farhad, Ghosh, Arindam, Rajakaruna, Sumedha, Dynamic operation and control of a hybrid nanogrid system for future community houses *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2015. 9 (11). 1168–1178, doi:10.1049/iet-gtd.2015.0462.
8. Company Eaton. Utility scale energy storage – critical infrastructure to provide power even when the grid is off. Utility storage / microgrid demonstration project. June 14, 2017. [https://www.ibesalliance.org/fileadmin/pdf/08\\_Eaton.pdf](https://www.ibesalliance.org/fileadmin/pdf/08_Eaton.pdf)
9. Wang, Y. T., Tan, K., Peng, X. Y., So, P. L. Coordinated Control of Distributed Energy Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. July 2015. 31(3). 1132–1141, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2462723.
10. Zhou, Jinghua, Zheng, Yang, Zhou Jinghua1, Zhang, Xiaowei. Energy Storage Power Conversion System in the Micro-grid. *International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy*. 2015. 261–266, doi: 10.2991/icismme-15.2015.51.
11. Prehoda, Emily W., Schelly, Chelsea, Pearce, Joshua M. U.S. Strategic Solar Photovoltaic-Powered Microgrid Deployment for Enhanced National Security *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 23 May 2017. 78. 165–175, doi:10.1016/j.rser.2017.04.094.
12. Shydlovskiy, A. K., Zharkin, A. F., Novskiy, V. O., Kaplychniy, N. M., Kozlov O. V., Malakhata, D. O. Zabezpechennia elektromagnitnoi sumisnosti v lokalnykh elektrichnykh merezakh. *Visnyk NTU «KhPI»*. 2018. 26 (1302), vol 1. 174–183, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.24.
13. Zharkin, A. F., Novskiy, V. O., Malakhata D. O. Kompleksne pokrashchennia yakosti elektroenerhii ta zabezpechennia elektrobezpeky v lokalnykh systemakh elektropostachannia pry zastosuvanni hibrydnykh filtrokompensuiuchykh peretvoriuvachiv. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. 1. 69–78, doi:10.15407/techned 2018.01.069.
14. Kulkarni, O. Mishra, M. Power quality improvement using Zig-Zag transformer and DSTATCOM in three phase power distribution system. *India Conference (INDICON), Annual IEEE. Mumbai, India. 2013. 1–6, doi: 10.1109/INDCON.2013.6725916.*
15. Jayaprakash, P. Singh, B., Kothari, D. Reduction in rating of voltage source converter of DSTATCOM using a Zig-Zag transformer. *Industrial Electronics (ISIE), Hangzhou, China: IEEE. 2012. 1066–1071, doi: 10.1109/ISIE.2012.6237236.*
16. Jayaprakash, P. Singh, B., Kothari, D. Reduction in rating of voltage source converter of DSTATCOM using a Zig-Zag transformer. *Industrial Electronics (ISIE), Hangzhou, China: IEEE. 2012. 1066–1071, doi: 10.1109/ISIE.2012.6237236.*
17. Shen, X., Zhu, S., Zheng, J., Han, Y., Li, Q., Nong, J. Active distribution network expansion planning integrated with centralized and distributed Energy Storage System. *M. Power & Energy Society General Meeting, IEEE. 30 July 2015. 1–10, doi:10.1109/PESGM.2015.7286069.*
18. Zharkin, A. F., Novskiy, V. O., Martynov, V. V., Paziiev, A. H., Palachov, S. O., Rudenko, Yu. V. Systemy nakopychennia enerhii na osnovi zastosuvannia potuzhnykh dvonapriamlenykh peretvoriuvachiv. *Visnyk NTU «KhPI»*. 2018. 26 (1302), Vol 1. 25–33, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.04.
19. Zharkin, A. F., Novskiy, V. O., Paziiev, A. H. Doslidzhennia dvonapriamlenoho peretvoriuvacha postinoi napruhy unifikovanoho invertornoho modulia dlia zastosuvannia v systemakh nakopychennia enerhii. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. 5. 31–34, doi:10.15407/techned2018.05.031.
20. Shen, X., Shahidehpour, M., Han, Y., Zhu, S., Zheng, J. Expansion Planning of Active Distribution Networks with Centralized and Distributed Energy Storage. *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Aug. 2018, doi:10.1109/PESGM.2018.8585964.*
21. Singh, R., Taghizadeh, S., Nadia, M., Tan, L., Mekhilef, S. Experimental Verification of a Battery Energy Storage System for Integrati with Photovoltaic Generators. *Advances in Power Electronics*. 2017. 1–10, doi: 10.1155/2017/8158964.

#### Інформація про авторів (About authors)

**Жаркін Андрій Федорович** – докт. техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України, заступник директора з наукової роботи, зав. відділу стабілізації параметрів електромагнітної енергії, Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна.

**Andrii Zharkin** – doctor of engineering sciences, prof, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Deputy Director for Science, head of department of stabilization of electromagnetic energy parameters, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

**Новський Володимир Олександрович** – докт. техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, відділ стабілізації параметрів електромагнітної енергії, Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна.

**Volodymyr Novskiy** – doctor of engineering sciences, senior researcher, leading researcher, department of stabilization of electromagnetic energy parameters, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

**Мартинов Вячеслав Володимирович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, відділ транзисторних перетворювачів, Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна

**Viacheslav Martynov** - candidate of engineering sciences, senior researcher, leading researcher, department of transistor converters, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

**Пазєєв Андрій Георгійович** - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, відділ стабілізації параметрів електромагнітної енергії, Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна

**Andrii Paziiev** - candidate of technical sciences, senior researcher, department of stabilization of electromagnetic energy parameters, The Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Жаркін, А. Ф.** Забезпечення якісного електропостачання в електричних мережах систем розподілу з відновлюваними джерелами енергії / **А. Ф. Жаркін, В. О. Новський, В. В. Мартинов, А. Г. Пазєєв** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 4-13. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.01.

*Please cite this article as:*

**Zharkin, A., Novskiy, V., Martynov, V., Paziiev, A.** Provision of high quality power supply in distribution networks with renewable energy sources. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Electric machines and electromechanical energy conversion.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **20** (1345), 4-13, doi:10.20998/2409-9295.2019.20.01.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Жаркин, А. Ф.** Обеспечение качественного электроснабжения в электрических сетях систем распределения с возобновляемыми источниками энергии / **А. Ф. Жаркин, В. А. Новский, В. В. Мартинов, А. Г. Пазєєв** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Электрические машины и электромеханическое преобразование энергии. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 20 (1345). – С. 4-13. – doi:10.20998/2409-9295.2019.20.01.

**АННОТАЦИЯ.** Рассмотрены особенности практического применения разработанных многофункциональных средств обеспечения надежного электроснабжения и нормируемых показателей качества напряжения в электрических сетях малых систем распределения. Отмечено, что такие системы имеют ряд известных преимуществ перед традиционными системами электроснабжения. В частности, малая система распределения электроэнергии включает в себя, как правило, несколько источников распределенной генерации, распределительных подстанций, накопителей и преобразователей энергии, что позволяет такой системе «Microgrid Plus» функционировать как в автономном режиме, так и быть связанной с внешней энергетической системой. В малой системе распределения качественное электроснабжение можно обеспечить путем применения, например, нерегулируемых и управляемых фильтросимметрирующих устройств или гибридных фильтрокомпенсирующих преобразователей, а также использования возобновляемых источников энергии с системами ее накопления (Energy Storage System). Рассмотрены основные аспекты практической реализации силовой части многофункционального двунаправленного преобразователя электроэнергии в составе унифицированного инверторного модуля мощностью 300 кВт для использования в современных многомодульных системах накопления энергии значительной мощности с различными типами источников энергии. Показано, что разработанные двунаправленные преобразователи в составе систем накопления энергии в нормальных режимах работы могут обеспечить необходимые уровни электромагнитной совместимости потребителей и регламентированные значения показателей качества напряжения в «Microgrid Plus», в частности, значение суммарного коэффициента гармонических искажений входных и выходных токов этих преобразователей составляют единицы процентов, а также при необходимости они могут осуществлять компенсацию реактивной мощности в микросети. Практическое применение предложенных систем распределения электроэнергии способствует реализации общей концепции «Smart Grid & Energy Storage», которая направлена на расширение возможностей возобновляемой энергетики и интеграцию в системы интеллектуальных электрических сетей.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, система распределения электроэнергии, двунаправленный полупроводниковый преобразователь, система накопления энергии, микросети, качество напряжения.

Надійшла (received) 15.06.2019